

Title	頻繁な量子脱絡みに動じない量子絡みと生物現象 (量子力学系の数理とその量子コンピュータへの応用)
Author(s)	松野, 孝一郎
Citation	数理解析研究所講究録 (2004), 1350: 66-75
Issue Date	2004-01
URL	http://hdl.handle.net/2433/25114
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	publisher

頻繁な量子脱絡みに動じない量子絡みと生物現象

松 野 孝一郎 (長岡技術科学大・生物系)

1 はじめに

生物現象が量子現象に密接に関連していることを見るために、量子現象を今一度振りかかって眺めてみる。

量子が非局所的な何ものかである、との見解は 20 世紀初頭のマックス・プランクまで遡る。プランクはそれまで誰も考えもしなかった問いを浮き彫りにした。ここに箱があり、その中に木炭が入っているとする。木炭は光、電磁波を放出、吸収しながら周りとは熱平衡にある。そのとき、木炭が放出、吸収する光のエネルギーの値は連続的に変化するのか、それともブツブツの細切れになっているのか、との問いがそれである。この問いから、エネルギー量子が生まれてきた。光を担うエネルギー量子、光子の運動は光エネルギーの放出、あるいは吸収の開始、進行、完了によって仕切られているのが分かる。進行形から完了形への移行が光子の放出、吸収に絶えず付きまとう。

完了形そのものには、直ちに進行形に逆戻りすることはないとする頑健さがある。この頑健さがなければ、完了形と進行形との区別が消えてしまう。更に、局所的な進行形の渦中にあるさまざまな運動を時空間内で仕切り、完了形に持ち込むためには、非局所的な抑え込みが欠かせない。正体こそ不明であるが、経験事実に基づく限り、エネルギー量子には、量子内部で進行しつつある運動を完了形に持ち込むとする非局所的な頑健さがある。物性物理で出会う、ありとあらゆる物質の安定性は、元をたせばエネルギー量子の非局所的な頑健さに辿り着く。

頑健な非局所性を伴うエネルギー量子の例には光子、電子、原子、分子がある。しかし、いずれも生物固有とは言いがたい。生物現象にとって固体物理に帰着することのない独自さがあるとすれば、その候補の一つは生物現象に固有な量子非局所性である。この問いへの一助となるのが内部観測である^{3,13)}。内部観測は識別される完了形を産み続けながら進行する運動そのものである。進行しつつある運動の現場にあって進行形を完了形に接続させるのがこの内部観測である。一方、完了形にある運動を外部から現在形で参照するのがわれわれ研究者の行う、通常の外部観測である。この内部、外部観測の絡み合いから、生物に固有な量子非局所性への一つの道筋が開けてくる。

物質代謝という現象は、進行形にある物質の運動を物質の放出、吸収という完了形によって仕切らせる内部観測運動そのものである。それに呼応して外部観測に立つならば、完了形に還元され、現在形で参照されることになる物質が代謝の前後に現れる物質である。物質代謝は、生物体内で進行する運動を完了形に接続させる頑健な非局所性があって初めて、実現可能になる、との見通しがここに立つ。これが単なる白昼夢であるか否かは、もちろん今後の検証に一方的に依存する。

その検証のための候補は、確かに一つはある。量子の伴う非局所性が、そのまま外部から直接に観測可能となる量子コヒーレンスがそれである。物性物理での超流動、超伝導は量子非局所性が外部観測の対象となった典型的な事例である。この非局所性は、波動運動を伴う量子が自分自身を収め、入れる頑健、かつ拡がりのある容れ物と一体となって出現することに由来する。ところが、波動運動の容れ物の形状はそれこそ千差万別である。容れ物の形状を指定しない限り、外部から量子を観測することは可能とならないが、それを指定する基準はなにもない。それだからこそ、超流動、超伝導は、当の現象に由来しない、それ以外の原因によって指定された容れ物、たとえば外部観測者としての研究者が指定した容れ物の中ですら実現することが出来る。

その量子コヒーレンスが生物現象の内に現れるとすると、このままでは済まなくなる。あらかじめ容れ物を用意して呉れている奇特なものに心当たりは何もない。容れ物とともに

に現れる量子は自前でその容れ物を調達せざるを得なくする。ここに生物固有の自律性が出現する。

局所から立ち上がり、進行しつつある波動運動としての量子が非局所的な頑健な容れ物を伴って時空間内に現れるとき、その容れ物の実現、選択を司る運動は時空間が連続体であることを想定しない。ところが、量子の波動運動は、その従うシュレーディンガー運動方程式が示すように、平坦ではあるが、連続した時空間を当然視する。シュレーディンガー運動方程式は連続時空間内に埋め込まれた量子の運動を真っ当に表現する。この見解は正当ではあるが、そこで当然視される連続時空間からは、波動運動体を入れる容れ物の形状を引き出すことができない。この容れ物はその内部から見定められた限界であって、観測を前提とする。シュレーディンガー方程式にとっての境界条件は時空間を不連続な仕方では仕切ることによって始めて生じてくる。それを生じさせるのが、内部観測である。それでは、どのようにして時空間の連続が破られ、境界条件と見なすことの出来る頑健な非局所性が現れてくるのか、という原理、原則にかかわる問いがここに立ち上がる。

時空間の連続性をまともに取り上げたのは一般相対性理論である。時空間の連続性という極めて思弁、哲学色彩の強い相手が質量とそれに等価な重力によって物理的に下支えられているとしたのは、物理学が成し遂げてきた最大の功績の一つであるのは間違いないが、それから時空間の不連続性は導かれぬ。相対論で時空間の連続が破られているとするのは例外的な特異点においてのみである。相対論を含む古典論には、時空間に不連続をもたらす仕組みが元来、備わっていない。ここに、時空間の連続の上に成り立つ一般相対論と時空間の随所において連続が破られているとする量子論との融和、言い換えるならば、相対論と量子論の双方を協調して補修する作業が火急の案件として登場する。

これまで相対論と量子論との融和はビッグ・バンそのもの、あるいはブラックホールの出現とその蒸発、との文脈で取り上げられて来た経緯があるが、時空間連続性の破れは生物現象にとってこそ緊急の課題となる。しかも、地球上の生物にとって、重力作用はここでの量子過程を司る静電作用に比べてあまりにも弱い。生物現象を量子コヒーレンスに繋ぎとめる時空間の不連続変化、頑健な非局所性の出現は重力作用ではなく、静電作用に求めざるを得なくする。果たして可能なことなのか？

それへの対策として、首尾のほどは今現在、定かではないが、一つの候補がある。生物体を構成する生体高分子にボルン近似（とその拡張）が適用可能である、とするのがそれである。ボルン近似は分子を構成する原子座標とその原子の周りをまわる電子の運動座標を実効的に分離して扱える、とする考え方の上に立つ。原子座標は電子にとっての静電ポテンシャルを提供することによって、電子の動きまわる空間の曲率を指定する。この曲率が不連続に変化すれば、電子にとっての空間は不連続に変わることになる。この静電ポテンシャルが、ボルン近似において当初予定されていた守備範囲を少々、逸脱し、電子の運動にあまり遅れることなく、素早くそれに追従できるとするならば、電子という量子がそれ自身を収め、入れる容れ物の形状を自律的に変える運動も併せともなうことになる。原子座標が提供する電子にとっての静電ポテンシャルは当然のことながら頑健な非局所性を伴う。ここで問われているのは、生物現象は果たして原子由来の静電ポテンシャルと電子運動が相互に相手を見定めながら、それに基づいて自分の運動を定めて行く、とする物理現象なのか、へのまともな対応である。

2 文脈中の物質とそれを支える物理

生物体を構成する原子、分子は全て、極めて特異な配置、拡がりのある文脈の中にある。この文脈の特異さが生物を生物たらしめる。生物現象への理論にとっての主要な課題は、物質がそこで配置されることになる文脈、別名、非局所的な境界条件、の分類とその根拠を明らかにすることにある。この課題は当然のことながら既に物理の領域で取り組まれてきた。まず、それから検討をはじめ。これまでに物質が伴う文脈として確立された典型例の一つに、20世紀初頭、マックス・プランクによって発見された文脈がある。

2. 1 プランク文脈

黒体輻射スペクトルの実測値を統計熱力学と整合させるためにプランクによって導入されたエネルギー量子性は、物質を担うエネルギー担体が量子としてその周りから区別されることを求める。量子が量子として安定であるためには、量子の内側と外側を区別する境界が確として安定に留まっていることが前提になる。この安定した境界が保証される限り、量子はそれが一体どのようなものであるのか、その明細を明らかにする文脈も併せて確定される。物質はエネルギー量子として、時空間内でそれを他から区別する安定した境界をともなった文脈、すなわちプランク文脈を伴う。この時空間内に現れる境界づけられたプランク文脈の特徴は、後のシュレーディンガーによって、その量子コヒーレンスにあることが判明した。プランク文脈が量子コヒーレンスを伴うとは、量子それ自体が量子遅延波と先進波との間で安定に維持される定在波によって担われているとの意である。しかも、この二つの波の間での整合のとれた位相関係は、文脈そのものの成立と等価であるとする非局所性、すなわち粒子性をも併せ備える。加えて、その言い回しがいかに不自然に見えようとも、量子は非局所的な、それにとっての境界条件とともにやって来る運動体である、とする事態が経験によって確認されるまでに至った。運動体にとっての境界条件をその運動体の外部に求めるとする古典論にはあり得なかった事態である。

ここでの非局所性は、物質の基本担体としてのエネルギー量子が時空上の点ではなく、非局所的な領域を伴うことを指す^{1,2)}。このプランク文脈の存在は物理のあらゆる分野で確認されてきたが、もちろん物理に可能な文脈はプランク文脈に限られてはいない。それを明かしたのはプランクより少し以前のルードウィヒ・ボルツマンであった。

2. 2 ボルツマン文脈

マックスウエルに倣い、ボルツマンは、その気体運動論に持ち込んだ衝突数の仮定、すなわち気体分子は他の分子と数回衝突するとそれ以前の記憶を失うとする仮定に基づいて、気体分子がやがては熱平衡分布に到達することを導いた。熱平衡を特徴付けるのはその温度である。このことは、温度が衝突数の仮定をもたらす文脈、すなわち衝突数の仮定を実現可能とする境界条件を特徴付ける定量指標であることを表わす。言い換えるならば、温度は個々の物体が相互に殆どランダムに運動し合うことを保証する文脈を前提とし、その文脈を特徴付ける定量指標であることを表わす。温度は相互にランダムに運動し合う物体が与えられたとき、そのランダムさの強さを表わす示強変数である。ボルツマンが見出したこの文脈、ボルツマン文脈は温度と呼ばれる強度の実現を保証する文脈である。温度を是認する限り、文脈構成要素が相互に殆どランダムに運動し合うことを保証する文脈が物質現象中に広範囲に現れることになる。プランク文脈は文脈構成要素が相互に殆ど完全な量子コヒーレンスを維持することにその特徴があるが、ボルツマン文脈はその正反対に位置する。ボルツマン文脈は文脈構成要素が相互に殆ど完全にランダムなインコヒーレンス、あるいはデコヒーレンスを維持するところにその特徴がある。

2. 3 異なる二つの物質文脈とその間をとりもつこと

温度を主要な示強変数として容認する熱力学はそこに現れる物質運動をボルツマン文脈の上に立脚させる。一方、量子力学は当然のことながら、そこに現れる物質運動をプランク文脈の上に立脚させる。物質運動を対象としながら、その物質運動はどのような文脈の中で現れてくるのかと問うとき、物理にはこれまでに全く異質の二つの文脈、プランク文脈とボルツマン文脈とが現れてきた。しかし、この異質の二つの文脈、すなわち熱力学と量子力学が相互に無関係な個々の境界条件から成り立っているとするならば、それこそ物質運動の統一した理解を目指す物理も生物物理も立ち行かなくなる。そのことはプランクにおいてもすでに明らかであった。量子の統計を通して熱力学に達する、とする通路を初めて開いたのが他ならぬプランクであった。それ以後、量子力学と熱力学の融和をこの統

計量子力学に求めるとする流儀は物性物理においてそれこそ枚挙に暇の無いほどの事例において成功を収めてきた。いくら評価しても評価し過ぎることにはならない。

統計量子力学（慣例に従えば、量子統計力学と呼ぶ）は量子の集団の運動を個々の量子の平均から求めても、量子そのものに何の変化も及ぼさないとする考え方の上に立つ。そうでありながら、量子から熱力学に至るのが唯一、量子の統計によるより他に方法はないのか、と問うことはできる。

量子から熱力学に至るのが量子の統計に依る、とするならば、それはプランク文脈が予めなんらかの手段を介して与えられ、その後にボルツマン文脈が定まるとする構図をとる。だが、このままではプランク文脈が一方的にボルツマン文脈を定め、それを支配することになる。この一方的関係を単なる約束事とするのであるのならば、何事もなく、かつそれが極めて有効な約束事であったのは実証済みであるが、約束事によって事実関係が曲げられることはない。ここに、ボルツマン文脈が逆にプランク文脈の成立に影響を及ぼすことはないのか、との正当な懸念が生じてくる³⁾。この懸念は統計量子力学への単なる批判であるのではない。この懸念に面と向かうことによって、これまで成功を収めてきた統計量子力学への評価をより強固なものにすると同時に、量子力学と熱力学の融和を支配と従属ではなく、より自然なものに求めるとする期待が生じてくる。

この量子力学と熱力学の融和の自然化はこれまで物理において明示的に、かつ積極的に取り上げられることはなかった。確かに、生物物理には従来の物理には収まりきれないところがある。ここにおいて、量子力学と熱力学の融和の自然化が、他に伍して一本立ち出来る生物物理を下支えする一つの標語になりはせぬか、との樂觀が生じてくる。しかも、このことを文字にすることによって、後戻りすることの出来ない一つの樂觀がたった今、表明されてしまった。これからは、もちろん、それへのありとあらゆる批判的検討を覚悟しなければならないのは当然のことである。

3 文脈形成運動としての生物過程

何はさておき、経験現象としての生物過程と熱力学との接点は熱力学第一法則にある。生物体は極めて複雑精緻なエネルギー変換を行う一つの物質組織体である。そのエネルギー変換にすべからず適用されるのが、熱力学第一法則である。エネルギーの質に関していかなる変換がなされようとも、その変換の前後で量としてのエネルギーは保存されるとする経験則は、これまでの経験に関する限り無謬であった。そのため、この第一法則は生物過程を対象とする物質運動にとっても充分な指針を与えるはずである。

3. 1 プランク文脈を形成する熱力学第一法則

熱力学第一法則は、ある熱力学系からある特定の質を伴ったエネルギーが流出するとき、その流出量を相殺するだけのエネルギーがその外から当の系に向けて流入することを言い表す。ただし、流入するエネルギーの質に関しては不問のままに留めおかれる。また同じように、ある熱力学系の外からその系に向かってある特定の質を伴ったエネルギーが流入するときも、それを相殺するだけのエネルギーが系外に流出することをこの第一法則は保証する。ただし、流出するエネルギーの質に関しては不問のままに留めおかれる。この熱力学第一法則はボルツマン文脈を伴う物質運動系には当然のことながらあてはまるが、経験則としての熱力学第一法則はボルツマン文脈のみを対象として現れてきたのでは決していない。第一法則が想定するエネルギー変換はボルツマン文脈を伴う物質運動系に限られてはいない。プランク文脈を伴う物質系が第一法則の想定するエネルギー変換を行う可能性も当然のことながら生じてくる。

そこで、この熱力学第一法則を、プランク文脈を伴う一つの物質系にあてはめ、その妥当性の可否をみることにする。このプランク文脈系からエネルギーの恒常的な流出が可能であるとき、当のプランク文脈系はそこから流出するエネルギーを相殺するだけのエネルギーを賄うべく周りの熱浴に働きかける。このプランク文脈からの恒常的なエネルギー流

出とそれを賄うエネルギー流入の確保が可能となると、しかもなんらかの擾乱によってエネルギー流出（入）が増加してもそれを相殺するエネルギー流入（出）が確保されるとき、このプランク文脈での恒常的なエネルギー変換が確かに維持される。この熱力学第一法則を実現することになるプランク文脈系は当然のことながら、熱浴すなわち一つのボルツマン文脈系に接することになる。何故なら、ボルツマン文脈系との接触が絶たれるならば、当のプランク文脈系において熱力学第一法則が想定する熱浴とのエネルギー変換の途も絶たれてしまうからである。実現することになるプランク文脈系の恒常性は周りのボルツマン文脈の影響下にある。ここにおいて、ボルツマン文脈がその下で実現することになるプランク文脈に影響を与える、とする一つの方途が開けることになる。このボルツマン文脈に対して十分に可塑的に適応するプランク文脈を形成、実現させるのが熱力学第一法則でのエネルギー変換である⁴⁾。すなわち、ここでは統計ではなく、熱力学第一法則が量子力学と熱力学との融和を計ることを行う。

ボルツマン文脈中にあるプランク文脈は、そのボルツマン文脈からの擾乱を糧として熱力学第一法則の想定するエネルギー変換を恒常的に実現するように自らの文脈を可変とする運動にかかわることが出来る。このボルツマン文脈からプランク文脈へ影響波及をもたらす運動は統計量子力学ではその方法論の故に禁止されていた。与えられたプランク文脈からボルツマン文脈を構成し、そのボルツマン文脈の統計尤度を最大とするプランク文脈が実際に実現するプランク文脈である、とする統計量子力学とは異なる運動がここに導かれたことになるが、それをより確実なものにするには事実に基づく直接の証拠、あるいは少なくとも状況証拠を必要とする⁵⁾。

3. 2 アクトミオシン系での ATP 加水分解

ここで、熱力学第一法則に基づくエネルギー変換が、あるプランク文脈の実現に主要な働きを示したとみなされる一つの状況証拠を取り上げてみる。その事例とは、筋収縮を司るアクトミオシン系での ATP 加水分解である。1 個の ATP 分子をアクトミオシン系で加水分解するのに要する時間 τ_{ATP} は凡そ $\tau_{ATP} \cong 10^{-2} \text{ sec}$ であり⁶⁾、それから解放されるエネルギー e_{ATP} は凡そ $e_{ATP} \cong 5 \times 10^{-13} \text{ erg}$ (または 7 kcal/mol) である⁷⁾。このエネルギーを一つの量子によって放出するのであれば、不確定性原理より 1 フェムト秒 (10^{-15} sec) で充分であるが、実際のエネルギー放出にはそれよりも 10^{13} 倍ほども長い時間を要する。このエネルギー放出過程は当然のことながら量子力学過程に従っているはずである。そこで ATP 分子が分解されるとき、エネルギーを小出しにして時間間隔 Δt_m 毎に e_m のエネルギーを放出するとするならば、不確定性原理より

$$e_m \Delta t_m \cong \hbar$$

$$\frac{e_m}{\Delta t_m} = \frac{e_{ATP}}{\tau_{ATP}}$$

が成立する。ここで \hbar はプランク定数である。 Δt_m 毎に e_m のエネルギーを小出しにし、 $\tau_{ATP} \cong 10^{-2} \text{ sec}$ の時間の間に総計 $e_{ATP} \cong 5 \times 10^{-13} \text{ erg}$ のエネルギーが放出されたとするならば、それは $\Delta t_m \cong 4.5 \times 10^{-9} \text{ sec}$ 毎に $e_m \cong 2.2 \times 10^{-19} \text{ erg}$ のエネルギー量子が放出されたのと等価になる。このエネルギー放出を黒体輻射とみなすならば、それは絶対温度 $1.6 \times 10^{-3} \text{ K}$ の黒体と等価であることが判明する^{8,9)}。

アクトミオシン系は ATP 加水分解中にあるのは、実効的に 1 ミリケルビンほどの極低温になる。これは非局所的な量子凝縮を生じさせるのに充分な極低温である。かつ、その系は 310 K ほどの熱浴に絶えず接し続ける。アクトミオシン系から実効的な極低温域に向けてのエネルギー流出が可能になるためには、熱力学第一法則より、この系が接している 310 K の熱浴からのエネルギー流入があることが前提となる。このことは逆に、アクトミオ

シン系はそこでの ATP 加水分解を可能となし、実効的な極低温を実現すべく絶えず 310 K ほどの熱浴に接し続けようとする。それを促しているのが熱力学第一法則である。ミオシン分子が ATP 分子を加水分解している最中にアクチン繊維がミオシン頭部上を滑るのは熱力学第一法則に促され、ATP 分解によるエネルギー流出を賄うべく高温熱浴からのエネルギー流入を実現させようとしている、と見なすことができる。

ATP 加水分解中のアクトミオシン系は実効的には極低温にあり、それに伴う量子コヒーレンスが発生する。これはとりも直さず、このアクトミオシン系が一つのプランク文脈を構成することを表す。しかもこのプランク文脈を実現するためにはそれへのエネルギー流入を賄う高温のボルツマン文脈を必須とする。原始地球上で生命が出現したのとはほぼ同時に出現し、それ以来現在に至るまで延々と存続してきたアクトミオシン系は量子力学と熱力学との融和を量子の単なる統計ではなく、量子そのものの可塑性、適応性にもとめる。それを支えているのが熱力学第一法則である。

3. 3 磁化をおびるアクチン繊維

アクトミオシン系を構成するアクチン繊維は隣り合うアクチン単量体が互いに静電分極を引き起こし、電気双極子相互作用を介して引き合うことにより維持される重合体である。アクチン単量体の安定性はもちろん量子非局所性に求められるが、重合体をもたらす電気双極子相互作用は古典的な静電現象の枠内でも十分に理解可能となる。一方、アクトミオシン系での ATP 加水分解が量子過程であるとする、それに関わるアクチン繊維が古典論に従う物体であるとするのは何としても理解しがたい。少なくとも ATP 活性下においてアクチン繊維に固有な量子非局所性があるはずである。

その非局所性を探り当て一助として、数箇所蛍光指標を付したアクチン繊維を用意し¹⁰⁾、それから構成されたアクトミオシン系を磁場の中に置き、ATP を加えてアクチン繊維を滑らせた。関心を払った対象は、蛍光標識部の揺らぎである。この実験より、印加した磁場の値がある閾値（約 65 mT ）より小さいとき、磁場の増加に対して揺らぎの値が増加することが判明した。この事実は、アクチン繊維が磁化をおび、かつ磁場中で揺らいでいることを示す¹¹⁾。磁場の中で磁石（磁化）が運動するとき、磁場の値が小さいときにはそれから運動エネルギーを獲得する。これは電動機に対応する。逆に磁場の値が大きくなると磁石はその運動エネルギーを磁場に与える。発電機に対応する事象である。その境界は、丁度、印加された磁場による真空の磁化がそこで運動する磁石の磁化と等しくなるところである。

ここで発生する磁化は ATP 濃度が 2 mM のとき、アクチン単量体当たり、凡そ $180\mu_{\text{B}}$ （ボーア・マグネトン）であった。この磁化によって隣り合うアクチン単量体が引き起こす磁気双極子相互作用のエネルギーは約 $1.1 \times 10^{-22}\text{ J}$ （ジュール）であり、室温での 1 運動自由度当たりの熱エネルギー $4 \times 10^{-21}\text{ J}$ よりはるかに小さい。実測された、全長 $5\mu\text{ m}$ にもおよぶアクチン繊維に沿って発生した磁化は単なる磁気双極子相互作用によるものではない。それでは、何がこの整然とした磁化をもたらしたのか？この探索に消去法を当てはめたとき、生き残ってくる候補の一つが、ATP 活性時のアクトミオシン系に固有な量子非局所性である。その非局所性実現のためには、少なくとも熱擾乱がもたらす、特性時間 10^{-13} sec 程度のデコヒーレンス¹²⁾よりも素早く量子コヒーレンスをもたらす仕組みが求められる。

4 量子絡みと脱絡み

アクトミオシン系に固有な量子コヒーレンスを伴った非局所性は時間、空間のうちに現れてきた一つの内外関係である。しかも、この内外関係の現れを因果的にとらえようすると、時間、空間そのものに対して新たな緊張をもたらすことになる。因果関係を真実に規定するには時間、空間が予め指定されていない限り、それは可能とはならない。そうでありながら、運動体を限界づける内外関係もその内と外を判別する舞台を必要とする。かつ、内外関係を司る舞台を規定する時間、空間と因果関係を規定する時間、空間は互い

に異質であるはずである。もし仮に因果関係を定める時間、空間がそのまま内外関係を定める時間、空間になるとするならば、内外関係は因果関係に従属させられてしまうが、経験事実はそれを否定する。事態に一応の收拾を与えるためには、この緊張が発生して来た歴史的経緯を振り返ってみるのが一便法になる。内外関係と因果関係の両者のうち、われわれの意識に先に登場して来たのは因果関係の方である。因果関係はわれわれが通常理解する三次元空間と一次元時間を前提とする。この先着順位を尊重するとするならば、内外関係にとっての時間、空間の素性を明かす責務を負うのは後発の内外関係を主唱する者の方に一方的に帰せられる。

量子を限界づける内外関係に固有な時間、空間の特徴を明かす試みは、偶然にもプランクによるエネルギー量子の発見に前後して、数学者ダヴィット・ヒルベルトによって準備されていた。ヒルベルトは通常の時間、空間での距離とは全く異なる新たな距離を定義し、その距離の上に成り立つ新たな空間、ヒルベルト空間を発明した。奇遇にも、このヒルベルト空間がプランクの発見した量子の内外関係を判定するための距離を規定することの出来る空間であることが判明した。その要点は、ヒルベルト空間の考案した距離がたまたま量子に固有な内外関係を判定するために極めて適していた、とする幸運さに見出される。このヒルベルト空間が経験世界で発生する内外関係の判定のために必要な距離を確かに提供しているとする確証は既に劇的な仕方では提供されるに至った。

一つは、1987年に地球上で観測することが出来るに至ったマゼラン星雲での超新星爆発にまつわるものである。この星雲は地球から約17万光年離れており、今から約17万年前に生じた超新星爆発の余波が1987年に先ず多量のニュートリノ粒子流として地球上に届き、それに後続して光子の流れが到達した。この光子流を測定してみると、超新星爆発を中心とするほぼ同心円上において光子の位相がほとんど一様にそろって四方八方に拡がって行きつつあることが判明した。このことは光子という量子がそれぞれ天文学的スケールでその同一性を保っているとの証を与える。光子という量子の内外関係を規定、判定する相対距離変化は、通常の時間、空間ではわれわれの直接の経験をはるかに超える規模のものであっても、それをゼロと見なしてよいとの事例が確かにここに得られた。量子がヒルベルト空間でそれに固有な距離を保存する、天文学的スケールでの実例がこれである。もう一つの事例は、地球上で発生させた光子の内外関係にまつわるものである。媒体は光ファイバーであるが、光子の大きさを10km程にすることが実験施設において実現することが可能になった。1998年のことである。通常の時間、空間では10kmもの隔たりのあるものが量子の内外関係を規定する距離空間ではその相対距離変化を消失してしまうことが明らかにされた。

加えて、量子を規定する内外関係にあっては、ヒルベルト空間内で相互間の距離変化がゼロであると判定されたものの間で時間が同期していることも判明して来た。このヒルベルト空間とそこでの同期時間を参照することにより、量子を規定する内外関係がいかなるものであるかを記述する仕組みが用意されたことになるが、もちろんこれで問題が解決された訳ではない。逆に新たな問題が生まれてくる。通常の時間、空間内で進行することになる因果関係はどうなってしまったのか、との問いが当然のこととして生じて来る。ヒルベルト空間とそこでの同期時間を温存する限り、量子を規定する内外関係は不変に留まる。これはあくまでも方法論由来の不変性である。ヒルベルト空間を用いて距離を確定するためには、量子を与えられたものと見なし、量子を定める内外関係はその距離を確定するまでの時間、不変に留まるものとする、とした距離判定者側からの要請が欠かせない。この要請は対象としている量子がその内外関係を変更することを禁止するが、量子それ自体がその内外関係を常に不変とするのか、あるいは可変とするのかは当然、別途問われるべき課題になる。それに先鞭をつけたのがフォン・ノイマンであった。

フォン・ノイマンは量子を規定する内外関係が可変となる過程に着目した。観測過程がそれである。その骨子は、観測という過程はヒルベルト空間内で設定された距離を保存する過程ではない、との否定的見解に見出される。これを肯定文で言い換えるとどうなる

のか、との問いが当然のこととしてそれに後続することになる。この新たな問いに対してフォン・ノイマンはウィグナーと共に、観測者の意識がそれを為しとげるであろう、との推察を提供した。しかし、この見解はその後、多くの賛同者を得るまでには至らなかった。意識が量子を規定する内外関係にどのようにして干渉を及ぼすのか、への具体的手続きが未だ明示されていなかったからである。しかし、観測という過程が経験そのものの成り立ちの根底に配されていることに思いを致すならば、フォン・ノイマンとウィグナーの見解に更に要請されるのは、観測という運動、行為から観測者の意識への道筋がいかにしてつけられるか、への納得の行く話の展開となる。

そのための一つの方策は、ヒルベルト空間内では離れ離れになっている相異なる量子が通常の空間内でお互いに重なり合う可能性に観測の起源を求める、とするものである。この重なり合いがシュレーディンガーの命名による量子エンタングルメント（絡み）である。量子は通常の時間、空間ではそれぞれ波動として示されるため、これらの波動を重ね合わせたものもまた新たな一つの量子を与える波動になる、との経験事実がこの量子エンタングルメントの背後にある。観測は、量子エンタングルメントとは正反対の脱エンタングルメントに対応づけられる、とすることがフォン・ノイマンとウィグナーの観測理論の根底にある。観測とはヒルベルト空間での単なる相対的な距離の測定とは異なる。観測される量子の素性を明らかにするためには観測者、あるいは観測器が提供する基準、基底が前提となり、その基底が明らかにされて始めてこの観測が遂行可能になる。その基底も量子として提供される。観測とは観測されるべき量子を観測器が基準、基底として提供する量子に還元する作業を伴う。この還元作業が観測器の遂行する観測であって、重ね合わせとは反対の脱エンタングルメントをもたらす。

二つの相異なる量子が通常の空間内において出会うとき、互いに絡み合う。この量子絡みが観測という過程をもたらす母体になる。量子絡みがそのまま不変に保ち続けられるならばそれ自体も一つの新たな量子と見なされるのであるが、観測過程にあっては絡み合っている一方の量子が他方の量子からの影響を被ることにより、自分そのものを変換させる。これが量子脱絡みである。経験世界のうちで相手を被験するという観測は相手を自分に合わせて受け入れることを指す。この量子脱絡みは、観測過程が物質を構成する全ての量子に適用されることを改めて明示する。これは量子にとっての内部観測に他ならない。内部観測であるならば、この観測は間断なく継続する。確かに、量子脱絡みを被った量子が再び新たな別の量子と出会うことによって絡み合い、その量子絡み合いにまた新たな量子脱絡みが後続する。この量子絡み、脱絡みの延々とした継起が量子の関わる内部観測の内実となる。

相異なる量子の絡みから脱絡みに至る内部観測の典型例は化学反応に見ることが出来る。水素分子と酸素分子が出会い、それから水分子が生成される化学反応では先ず水素分子と酸素分子が出会うことが前提である。この出会いにおいては、先ず水素分子と酸素分子という二つの量子の重なり合いが生じる。これが量子絡みである。この絡み合いの渦中において水素分子は酸素分子を、酸素分子は水素分子をそれぞれ被験する。一方が他方を観測する。この内部観測に伴う一方での量子脱絡みの結果は再び他方との量子絡みに関わる。水素分子と酸素分子から水分子が生成されるとは、この水素分子と酸素分子との間の量子絡み、量子脱絡みの連鎖が水分子の生成により完結されることを表わす。量子としての水素分子、酸素分子はそれぞれ独自の内外関係を伴うが、この量子は通常の空間で出会うことにより互いに観測し合い、新たな内外関係を生み出して行く。量子を定める内外関係を樹立していく運動は、通常の空間での量子絡み、量子脱絡みの因果連鎖であることがここに明らかとなって来る。それぞれの量子を特徴づける内外関係と相異なる量子を識別するための距離を与えるのはヒルベルト空間であるが、その内外関係に変化を与えるのは通常の空間で作動する因果関係となる。ヒルベルト空間で規定される量子の内外関係は通常の空間で作動する量子絡み、脱絡みという因果関係から立ち上がってくる。

この相異なる量子の出会いから立ち上がる新たな内外関係の生成は単なる化学反応だけ

に留まっていはいない。その極めて精緻な事例はわれわれを含む生物体とそこで進行する生化学反応である。われわれが死ねばその体はやがては朽ちて行くが、死の直後では体の姿、形は生きていたときと殆ど変わりがない。姿、形だけでは生死の判断が付き難く見える。しかし、運動に着目するならば決定的な差異があることに直ぐに気づく。心臓の動きが停止することによって死に至る。心臓が鼓動を打つためには心筋の収縮、すなわち筋肉の収縮運動が不可欠になる。筋肉の収縮運動にはそのためのエネルギーを必要とする。そのエネルギー源は ATP と呼ばれる化学分子に求められる。われわれの体は生きていくときには、絶えず体内で ATP 分子を生成しながら、その生成された ATP 分子を分解し、それからエネルギーを取り出すことを行い続ける。そこで取り出されたエネルギーが心筋の収縮を含む運動の駆動源となる。われわれが活着している限り、ATP の生成と分解という化学反応がその体の至るところで絶えることなく進行しつつある。個々の化学反応は水素分子と酸素分子との出会いによる水分子生成の化学反応がそうであるように、内部観測、すなわち量子絡みに後続する量子脱絡みの連鎖によって特徴づけられる¹¹⁾。

活着している体はその内部で進行する量子絡みと脱絡みの絶えることない連鎖を被りながらも、それ自体として頑健な内外関係を立ち上げている。これは、われわれが自分の体の内と外を明瞭に区別することが出来、かつその区別がかなりの期間、十分に安定したものとして定着していることを言い表す。これを、われわれの体を構成する個々の量子が絡み合うとする観点から眺め直して見るならば、われわれの体自体が一つの大きな量子絡みから構成されていることが分かる。しかも、この量子絡みはその内部から絶えず量子脱絡みを被験しながらも頑健に留まり続ける。われわれの体はその至る所で量子絡みという内部観測を被りながら、全体として一つのまとまりのある内外関係を立ち上げつつある。これはわれわれの体が絶えざる量子脱絡みを被験しながらも結果において頑健に留まることの出来る一つの大きな量子絡みであり続けることをもたらす。

量子はその最初の導入過程において極めて微視的なもの、ミクロなものとされて来た歴史的経緯があった。しかし、これはあくまでも歴史の偶有性に依存した事態である。確かに、安定した内外関係によって規定された量子として経験的に最初に確認されたのは熱平衡にある輻射場を構成する光子であって、それは極めて微視的であった。微視的であったのは光子の属性の一つとしての位相に関してであって、光子が微視的であるとしたのではない。地球上の実験室で確認された熱平衡にある輻射場では、それを構成する光子が同一の位相を伴っていると判定されている距離が極めて短いとされることによる微視性がそれである。光子そのものはその量子絡みに着目するならば、マジェラン星雲での超新星爆発に由来する光子流が示すように、それは天文学的な巨大さを示す。かつ、量子と量子絡みとの間の見かけ上の違いは対象そのものの違いではなく、あくまでもその対象を観測する側での事情による違いである。量子を観測するとは観測する側が用意する基準、基底に合わせてその量子を観測するのであって、量子が観測されたとするならば、それは用意された基底を構成するいずれかの量子に還元されることになる。この還元以前の量子は観測器によって量子絡みそのものと見なされながら、観測によってこの対象は量子脱絡みを被り、観測器の基底を構成するいずれかの量子に還元される。

量子絡みとは他による観測を前提とした量子の謂であって、間断のない観測が遍在しているとの内部観測に留意するならば、現象としてわれわれの注意を喚起するのは絶えざる量子脱絡みを被っても頑健に留まることの出来る量子絡みである。それを特徴づけるのが安定した内外関係である。その典型例がわれわれの体であり、生物有機体である。その中であって、また新たな緊張が発生する。われわれは間断のない量子脱絡みを被っても頑健に留まることの出来る量子絡みを指摘するまでに至ったが、指摘されている事態はあくまでも進行形にある。ところが、この指摘自体は三人称現在形のままである。三人称現在形をいかにして守護すればよいか、が火急の課題としてここに登場する。われわれの精神は対象を限界づけることを行うが、その内外関係の立ち上げを目指して頑健な量子絡みを留意するまでに至りながらここでそれ以降の試みを断念してしまうならば、これまでの試

みが水泡に帰しかねない。求められるのは頑健な量子絡みからいかにして三人称現在形を導き出すことが出来るかへの道筋である。

5 おわりに

物質運動を対象とする物理では量子力学と熱力学が主要な役を担う。生物においても同様である。物理ではこれまで量子力学からその統計を経由して熱力学をもたらすとする見解が支配的であったが、これはゆえ無きことではない。統計尤度を最大とするのは極めて合理的である。しかし、物質運動が同様に合理的であるか否かは、定かではない。特に、生物で遭遇する物質運動は極めて複雑精緻な文脈を伴って現れるのを常とする。ここで文脈そのものが運動する対象として浮かび上がってくる。

文脈が固定されていれば、それを当の運動から独立した境界条件と見なすことにより問題解決が計られる。このことは物理において肯定的に既に実証済みである。一方、文脈そのものが可変となる運動では境界条件の設定がままならない。運動そのものがそれへの境界条件の変化とともにやってくる。生物物理にとっての課題は文脈そのものの運動である。かつ、文脈運動は、文脈構成要素が相異なる文脈に同時に属することは出来ない、とする選択性を常に示す。物質代謝に関わる分子は同化か異化のいずれか一方にのみ属する。1 個の分子が同化 50%、異化 50%ということはあるにない。この二者択一は統計尤度を最大とする合理性には相容れない。そうではあるが、物質運動にかかわる文脈として幸いにも物理から、プランク文脈とボルツマン文脈の二つを引き継ぐことができた。

本稿では、この二つの文脈が相互に適応し合う運動に、物理では見ることの出来なかった生物に固有な特徴が認められる、との楽観的なシナリオを展開した。生物は量子力学と熱力学との融和という課題に対して、物理がこれまで試みてきた統計操作に替わって、それよりも遥かに自然な熱力学第一法則を手段として活用する。この先取りした表明が妥当であるか否かに判定を下すのはもちろん当の筆者としての私ではない。

[文献]

1. Pribram, K. H., *Brain and Perception*, Lawrence Erlbaum (1991).
2. Umezawa, H., *Advanced Field Theory: Micro, Macro and Thermal Concepts*, American Institute of Physics (1993).
3. Matsuno, K., *Protobiology: Physical Basis of Biology*, CRC Press (1989).
4. Matsuno, K., Cell motility as an entangled quantum coherence. *BioSystems* **51**, 15-19 (1999).
5. Rizi, R. R., et al., Intermolecular zero-quantum coherence imaging of the human brain. *Magnetic Resonance in Medicine* **43**, 627-632 (2000).
6. Harada, Y., Sakurada, K., Aoki, T., Thomas, D. D., Yanagida, T., Mechanochemical coupling in actomyosin energy transduction studied by in vitro movement assay. *J. Mol. Biol.* **216**, 49-68 (1990).
7. Uyeda, T. Q. P., Warrick, H. M., Kron, S. J., Spudich, J. A., Quantized velocities at low myosin densities in an in vitro motility assay, *Nature* **352**, 307-311 (1991).
8. Matsuno, K., Being free from ceteris paribus: a vehicle of founding physics upon biology rather than the other way around. *Appl. Math. Comp.* **56**, 261-279 (1993).
9. Matsuno, K., Biodynamics for the emergence of energy consumers. *BioSystems* **42**, 119-127 (1997).
10. Hatori, K., Honda, H., Shimada, K., Matsuno, K., Propagation of a signal coordinating force generation along an actin filament in actomyosin complexes. *Biophys. Chem.* **75**, 81-85 (1998).
11. Matsuno, K., The internalist enterprise on constructing cell motility in a bottom-up manner. *BioSystems* **61**, 115-124 (2001).
12. Tegmark, M., Importance of quantum decoherence in brain process. *Phys. Rev. E* **61**, 4194-4206 (2000).
13. 松野孝一郎、内部観測とは何か 青土社 (2000)。